第2章

シミュレーションの"違い"がわかる設計技術者になろう

――PI解析，SI解析，EMI解析を支える基盤技術の全体像

村山敏夫，渡邊貴之，浅井秀樹

電源品質（PI：power integrity）や信号品質（SI：signal integrity），電磁波妨害（EMI：electromagnetic interference）の解析には，さまざまな方式のシミュレータが利用されている．ここでは，回路シミュレータや伝送線路シミュレータ，電磁界シミュレータの処理の違いと，それらが実際の設計のどのような場面で使われているのかについて解説する．

（編集部）

地上デジタル放送や次世代DVDなどが登場し，大量のデータを高速に処理して通信する必要性が高まっています．また，電子機器の製品サイクルの短期化に伴い，高機能で多品種の設計を短期間に完了させることが要求されています．こうした要件にこたえるため，設計の手戻りをなくし，上流工程の段階から最適な設計を行う必要があります．

このような状況を背景に，電子機器の設計はもとより，LSIの設計段階からシミュレーションを用いて最終的な電子機器を最適化する「協調設計」が注目されています（右掲のコラム「協調設計を成功させるかぎ」を参照）[2]．しかし，LSIと最終的な電子機器では解析する規模（大きさ，解析量など）や時定数が大きく異なります．一つの手法ですべてを検証することはできません．そこで多くのシミュレーション技術が提案され実用化されています．

ここではそれぞれのシミュレーション技術の特徴と実際の設計に適用した場合の利点について説明します．

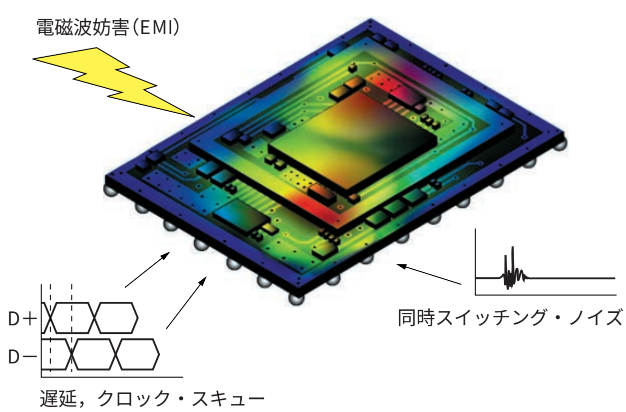


図1　高密度実装・高速信号設計における課題
大容量のデータを迅速に処理するためには，高速信号を確実に伝送する必要がある．信号が高速になると信号どうしのタイミングが厳しくなったり，スイッチング・ノイズによる信号への影響が問題となる．また，電子機器から放射される電磁波妨害の対策も困難になる

● 高性能電子機器設計のトラブルの原因は4種類

大量のデータを高速に処理するためには，電子機器にメモリを多く搭載し，高速クロックでデータを処理することになります．そのため，LSI内部では同時にスイッチング動作を行うトランジスタの数が増え，スイッチング電流が増大します．また，クロックが高速化すると立ち上がり時間も短くなります（図1）．

1）同時スイッチング・ノイズ

こういった状況では，LSIのワイヤ・ボンドなどのインダクタンス成分に高周波電流が流れます．その際，$L\Delta I$（Lはインダクタンス，ΔIは電流の時間変化率）の逆起電力が発生し，電源やグラウンドの電位が変動します．LSIの出力信号にノイズが混入することになり，誤動作や動作速度の低下を招きます．このように，高速信号設計では「電源品質（PI：power integrity）」が重要になってきています．

KeyWord　回路シミュレータ，伝送線路シミュレータ，電磁界シミュレータ，SPICE，PEEC，境界要素法，IBIS，差分法，有限要素法，FDFD，FDTD，TLM，モーメント法

2）遅延，タイミング

DDR（double data rate）などの高速なメモリを使用するとなると，数百ps（ピコ秒）レベルのタイミング調整が必要となります．そして，数cmの配線差やジッタが問題となってきます．そのため，LSIのI/Oバッファやパッケージを含めた信号の伝送経路全体を正確にシミュレーションしてタイミング調整を行う必要があります．こうした信号の遅延やタイミングについての問題は，一般に「信号品質（SI：signal integrity）」の問題と呼ばれています．

3）電磁波妨害（EMI：electromagnetic interference）

信号が高速になり，スルーレートが大きくなると，高調波ノイズの影響が深刻になります．機器が小型化するにつれて，プリント基板上の理想的な位置にデカップリング・コンデンサ（パスコン）を配置することが難しくなり，また高周波領域ではESL（effective series inductance；コンデンサや抵抗が持つ寄生インダクタンス）の影響でデカップリングの効率が悪くなります．

4）微細構造の影響

多層基板上を高速信号が伝搬する際に，隣接したビアとのカップリングなどの3次元的な影響が無視できなくなってきています．従来，このような部分は無視したり，簡単なモデルで置き換えて解析しても，十分な結果が得られました．しかし，Gbpsの信号伝送やミリ波帯通信機能を実装する際には，これらの影響を無視できなくなっています．

● 同じ現象を異なるいくつかの方法で模擬

上述の課題を設計の各段階で検証し，最適化するためには，さまざまなシミュレーション技術が存在します．これらをうまく組み合わせて，適材適所で用いる必要があります．

一般に，同じ現象を模擬する場合に，何種類かのシミュレーションの方法（アルゴリズム）が存在します．市販のツールは，どのようなシミュレーションの方法を採用しているのか，ユーザからはよくわからない場合が少なくありません．ここではシミュレータの種類と，それらが内部で実行している処理の概要について説明していきます．

これらのシミュレーションは，扱う対象により，電磁波を回路や伝送線路などのふるまいに置き換えて検討できる領域と，電磁波の波動そのものを解く必要がある領域に分けられます．基本的に各種のシミュレータはマクスウェルの方程式をどのように解くかで，おおまかに回路シミュレータ，伝送線路シミュレータ，電磁界シミュレータに分けて考えることができます（図2）．電界を $\boldsymbol{E}$（V/m），磁界を $\boldsymbol{H}$（A/m），電束密度を $\boldsymbol{D}$（c/m^2），磁束密度を $\boldsymbol{B}$（T），電流を $\boldsymbol{J}$（A/m^2）としたときのマクスウェルの方程式（時間領域）を以下に示します．

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \qquad (1)$$

● 回路シミュレータ：キルヒホッフの法則に基づいて解く

回路シミュレータは，抵抗，コンデンサ，インダクタ，ダイオード，トランジスタなどの素子を流れる電流と，素子と素子をつなぐ接続ポイント（節点）の電圧を，キルヒホッフの法則に基づいて計算するシミュレータです(3)．このようなシミュレータとしては，1970年代に米国University of California, Berkeleyで開発された「SPICE（スパイス）」が有名です．現在の回路シミュレータのほとんどがSPICEをもとに開発されていたり，SPICEとの互換性を持っているので，これらをひとくくりにSPICE系シミュレータと呼びます．

回路シミュレータは，電気工学における交流回路理論の考えかたに基づいて線状の回路網を仮定し，電流として導体や素子の中を流れる伝導電流 $\boldsymbol{J}$ にのみ着目します．周波数が低い場合には，$\boldsymbol{J}$ に比較して式（1）の変位電流 $\partial \boldsymbol{D}/\partial t$ の項は微小であるとして，無視することができます（準定

Column 協調設計を成功させるかぎ

企画段階などの，開発の初期段階からLSIと電子機器について協調した設計を行おうとした場合，背景の考えかたの違いなどから，LSI設計者と電子機器設計者の間の会話がかみ合わないことがよくあります．

例えば，LSI設計者は伝播遅延を出力バッファに対する容量性負荷をもとに考えることが多く，「出力バッファに接続する負荷は何pFか」を考えます．一方，電子機器設計者は特性インピーダンスと伝播速度（遅延）から信号遅延を判断します．また，電子機器設計で問題になることが多い電磁波妨害は，LSIのスイッチング・ノイズに起因しており，LSIの内部にデカップリング・キャパシタを形成することも有効な対策の一つです．しかし，こういったキャパシタも，LSI設計では電源の安定を目的に最適配置することが多く，同じ技術に対して見かたや目的，最適な配置結果が異なります．

このようなお互いの「ことば」の意味の違いを認識し合いながら，共通の目的に導いていくことが協調設計を成功させるかぎのように思えます．

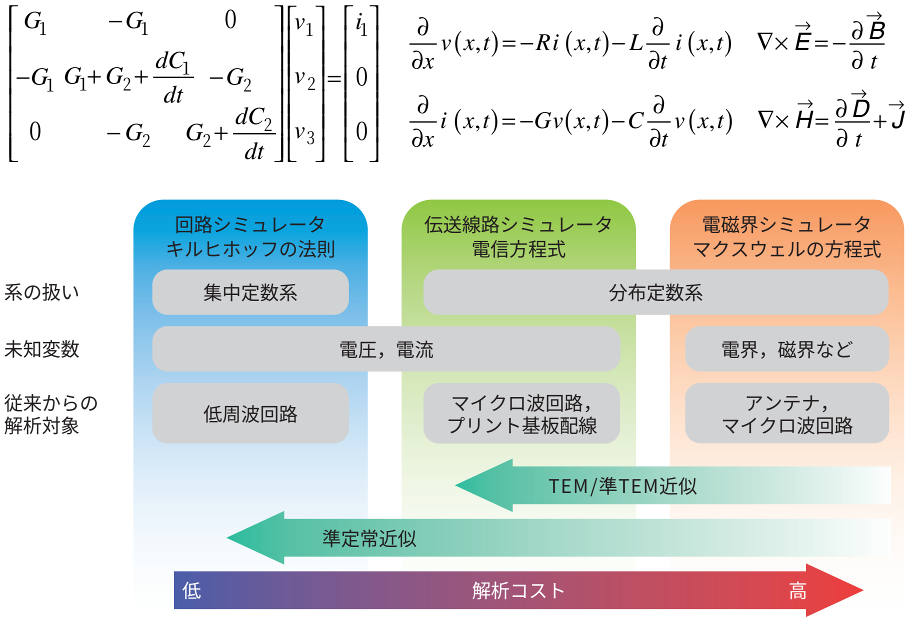


図2　シミュレータの種類と従来からの適用分野

シミュレーションでは，扱う対象の大きさや複雑さに応じてさまざまな解析手法が存在する．それぞれの手法に適した領域や検証する現象を把握したうえで，どの手法を用いるかを決定することが重要である

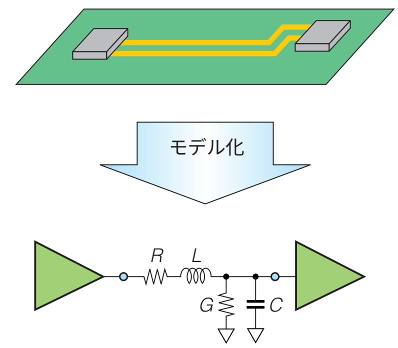


図3　寄生素子・伝送路のモデル化

回路シミュレーションや伝送線路シミュレーションでは，構造を*R*，*L*，*G*，*C*といった等価回路や伝送線路モデルに置き換えて挙動をシミュレーションする．寄生素子などの影響を検証するためには，これらを意図的にネットリストに付加することが必要になる

常近似）．ここで，式(1)の磁界の回転について発散をとると，キルヒホッフの電流則（節点における入出力電流の総和は0）が導かれます．

回路シミュレータでは，各節点において電流の総和が0という式を立て，これを連立させて解きます（図2）．各節点に接続されている素子に流れる電流（枝電流）は，節点間の枝電圧から計算します．例えば，導電率σ，断面積S，長さlの抵抗があった場合，抵抗に流れる枝電流iは，抵抗中に偏りなく一様に分布すると仮定し，枝電圧vを使ってオームの法則により$i=(\sigma\times S/l)\times v$と計算できます．回路シミュレータでは，あらかじめ抵抗値$R=1/(\sigma\times S/l)$を計算しておき，これを抵抗素子のパラメータとして入力します．コイルやコンデンサといった素子についても，あらかじめ素子の構造やレイアウトを基にインダクタンスLやキャパシタンスCを計算しておき，パラメータLを持つインダクタ，パラメータCを持つキャパシタとして回路シミュレータに入力します．

以上のように，回路シミュレータでは，自前では素子の物理的大きさを考慮できません．そのため，プリント基板やパッケージの配線抵抗や，配線導体間の寄生インダクタンスや寄生キャパシタンスを，あらかじめ物理的レイアウトを考慮して（電磁界シミュレータなどで）抽出しておき，これらをパラメータとする*RLC*素子を組み合わせて配線網をモデル化します（図3）．また，*RLC*を流れる電流は，節点間に偏りなく一様に分布していると仮定していますが，信号の波長が素子の長さに比較して無視できないくらい短くなると，もはやこの仮定は成り立ちません．したがって，配線導体を長さ方向により細かく区分化して，各区分を*RLC*の組み合わせでモデル化する必要がでてきます．

このような考えかたをもとにして，プリント基板やパッケージの配線網全体を多数の*RLC*素子の組み合わせとして表現する手法に「PEEC（partial element equivalent circuit）法」[1]があります．PEEC法では，導体を微小区間（フィラメント）に分割します．フィラメント間の寄生インダクタンスや寄生キャパシタンスを，3次元の境界要素法（BEM：boundary element methods；詳細は後述）などの電磁界シミュレータによってあらかじめ抽出しておき，これを組み合わせたネットリストを作成して回路シミュレータで解きます．

PEEC法では配線網全体を回路素子として表現できるため，トランジスタなどの能動素子を接続した解析が簡単に行えるという利点があります．一方で，すべてのフィラメント間の寄生キャパシタンスや寄生インダクタンスによる結合を考慮すると回路行列が密になり，計算量が膨大になるという欠点があります．

● 伝送線路シミュレータ：線路モデルを分布定数系で解く

集中定数系のシミュレータ（回路シミュレータ）では，素子間の結線を単なる節点として取り扱っているので，回路

動作にはなんら影響を及ぼしません．しかし，伝送信号が持つ周波数に対して結線が物理的に長い線路を持つとき，信号の減衰や反射，さらにはクロストーク・ノイズが発生します．したがって，これらのふるまいを正確に見積もるためには，結線を伝送線路としてモデル化したうえで解析することがたいせつです．

伝送線路とは，マイクロ波工学の分野でいうところの導波路の一種です．伝送線路では，絶縁された二つ以上の複数の導体を用いることで，直流から高周波までの電磁波を効率良く伝送することができます．プリント基板やLSIパッケージ内の配線は，ストリップ線路やマイクロストリップ線路などの伝送線路に近い構造である（意図的に伝送線路の構造を採用している）ため，伝送線路とみなして解析できます．伝送線路を伝搬する電磁波は，信号伝搬方向に電磁界成分を持たないTEM（transverse electromagnetic mode）波です．したがって，伝送線路シミュレータは，電磁界シミュレータのようにすべての電磁界成分を計算するわけではなく，TEM波の伝送を仮定して計算を行います．通常，マイクロストリップ線路では，信号伝搬方向にも電磁界成分が若干存在するため，実際にはTEM波に準じた「準TEM波」として取り扱います．TEM/準TEM波を仮定すると，マクスウェル方程式の式(1)は，電圧と電流を未知数として，次の電信方程式に簡単化されます．

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}v(x,t)&=-Ri(x,t)-L\frac{\partial}{\partial t}i(x,t)\\ \frac{\partial}{\partial x}i(x,t)&=-Gv(x,t)-C\frac{\partial}{\partial t}v(x,t)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(2)$$

ここで，R，L，G，Cはそれぞれ伝送線路の単位長さ当たりの抵抗(Ω/m)，インダクタンス(H/m)，コンダクタンス(S/m)，キャパシタンス(F/m)です．この方程式は，線路に沿った任意の位置で成立し，R，L，G，Cのパラメータは線路の至るところに分布しているため，分布定数系としての取り扱いが必要となります．

$$\begin{bmatrix}I(0,s)\\ -I(d,s)\end{bmatrix}=\frac{1}{Z_0\left(1-e^{-2\gamma d}\right)}\begin{bmatrix}1+e^{-2\gamma d} & -2e^{-\gamma d}\\ -2e^{-\gamma d} & 1+e^{-2\gamma d}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V(0,s)\\ V(d,s)\end{bmatrix}\quad\cdots\cdots(3)$$

ただし，

$$\gamma=j\beta=j\omega\sqrt{LC},\ Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}}\quad\cdots\cdots(4)$$

です．伝送線路シミュレータは，式(3)を使って端子の電圧と電流を計算します．

式(3)は周波数領域の式なので，周波数領域の計算は容易です．伝送線路シミュレータを使った解析では，配線の端子に，抵抗やコンデンサなどの素子や，LSIの入出力等価モデルであるIBIS（input/output buffer information specification）モデルを接続して，信号の減衰や反射，遅延のようすを解析します．周波数領域の解析では，これらをSパラメータとして出力したり，スミス・チャートにプロットして確認できます．

一方，（時間領域の）過渡解析を実行するためには，特別な方法が必要となります．例えば，式(3)を近似した時間領域の微分方程式を合成したり，畳み込み積分を行うなどしてシミュレーションを実行します．過渡解析では，伝送する信号のアイ・ダイヤグラムを表示させて，信号の品質やジッタを確認することも可能です．

また，複数の配線が近接していると，配線間の電磁的な干渉が発生し，信号のクロストーク（漏話）が発生します．これは，式(2)において，電圧と電流をベクトル，R，L，G，Cのパラメータを行列とした電信方程式で定式化できます．シミュレータによって何本までのクロストークを扱えるかの上限が異なるので，注意する必要があります．

ところで，電信方程式のR，L，G，Cのパラメータはどのようにして求めるのでしょうか？ これらのパラメータは，配線の断面形状をもとに計算されます．例えば，Cについては，2次元の電磁界（静電場）シミュレータによって求めることができます．通常，これらの機能は伝送線路シミュレータに備わっており，プリント基板のCADレイアウトから自動的に計算を行ってくれます．

さらに，厳密には，表皮効果や誘電損失といった物理的な効果により，R，L，G，Cのパラメータは周波数に依存して変化します．周波数に依存したR，L，G，Cのパラメータを扱えるのか，それとも特定の周波数を仮定してR，L，G，Cのパラメータを定数としてのみ設定できるのか，といった違いが，伝送線路シミュレータによってあります．

最近の伝送線路シミュレータは，内部では回路シミュレータを使って計算を行っている場合がほとんどです．この場合，伝送線路の部分の解析は，線路の端子間の関係式である式(3)の計算を行う素子（伝送線路素子）によって行われます．この素子と，IBISなどのLSIの入出力バッファ・モデルを接続して，回路シミュレータ上で解いています．伝送線路シミュレータは，回路シミュレータにいくつかの

表1
解析の種類と特徴
おもな電磁界解析手法の特徴と応用分野を示した．それぞれに特徴があり，解析したい対象や検討したい内容によって適切なものを選択する必要がある

	差分法（伝達線路行列法，時間領域差分法）	有限要素法	境界要素法（モーメント法）
解析領域	時間領域，開空間の解析には境界の処理が必要	おもに周波数領域，開空間の解析には境界の処理が必要	周波数領域，開空間の解析に有効
定式化	微分方程式	弱形式	積分方程式
おもな用途	プリント基板などの解析，クロストーク・ノイズ解析	インターポーザ（パッケージ基板）などの詳細解析	アンテナ設計 遠方界解析

機能を追加したものと考えると，わかりやすいと思います．すなわち，レイアウトCADとのインターフェースを用意して線路パラメータの抽出を自動化したり，伝送線路素子の種類（多結合導体，周波数依存，折れ曲がり，ストリップ，マイクロストリップ，コプレーナ，スロットなど）を充実させたり，結果をスミス・チャートやSパラメータとして出力するといった機能を備えています．

● 電磁界シミュレータ：マクスウェル方程式を直接解く

電磁界シミュレータは，伝搬する電磁波のふるまいを，マクスウェルの方程式を出発点として解くタイプのシミュレータです．従来，アンテナの設計や，電磁波を伝送するマイクロ波回路の解析手法として用いられてきました．

電磁界シミュレータを用いた解析では，解析したい領域内の任意の箇所の$\boldsymbol{E}$や$\boldsymbol{H}$の値をあらかじめ設定しておきます（境界条件）．電磁界シミュレータは，領域全体で式（1）が成り立つように，領域内の$\boldsymbol{E}$と$\boldsymbol{H}$を計算します（式（1）を“解く”という）．$\boldsymbol{E}$と$\boldsymbol{H}$を直接計算しないで，いったん別の物理量を計算し，間接的に$\boldsymbol{E}$と$\boldsymbol{H}$を導く場合もあります．過渡解析であれば，任意の箇所の$\boldsymbol{E}$や$\boldsymbol{H}$に初期値を与えておいたり，時間進行とともに入力波形を印加し，各時刻で式（1）が成り立つように計算を繰り返します．また，$\boldsymbol{E}$や$\boldsymbol{H}$が時間的に変化しないと仮定すれば，それぞれ静電場，静磁場の問題を解くことになります．

さらに，式（1）の$\partial/\partial t$を$j\omega$に置き換えることで，周波数領域のマクスウェルの方程式が得られます．これを出発点とすれば，任意の角周波数ωにおける$\boldsymbol{E}$や$\boldsymbol{H}$のふるまいを解析することができます．

式（1）を解くアルゴリズムには，差分法（FDM：finite difference method），有限要素法（FEM：finite element method），境界要素法の3種類があり，それぞれに一長一短があります．**表1**に，これらの特徴をまとめます．

● 差分法：微分方程式を差分表現で近似

差分法（FDM）は，微分方程式の導関数をそのまま差分表現に置き換えて近似します．例えば，ある関数$f(x)$のx_iにおける傾きは，x_iから微小な距離（$\pm\Delta x$）離れた点x_{i-1}，x_{i+1}におけるfの値を用いて，以下のように近似できます（これを中心差分と呼ぶ）．

$$\frac{df(x_i)}{dx} \simeq \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad \cdots\cdots(5)$$

一般的には解析したい領域を格子状に分割し，各格子点に未知変数（$\boldsymbol{E}$や$\boldsymbol{H}$）を置きます（**図4（a）**）．各格子点で式（1）の差分表現を導き，これを連立させると，大規模な線形連立方程式が得られます．適当な境界条件を設定して行列ソルバ（行列式を解くプログラム）を使って解けば，全格子点の$\boldsymbol{E}$や$\boldsymbol{H}$が得られます．

行列ソルバには，ガウスの消去法やLU分解に代表される直接法と呼ばれる種類のソルバと，CG（conjugate gradient）法に代表される反復法を用いたソルバがあります．直接法では，行列の次元数をnとすると，最悪の場合，解を求めるのに$O(n^3)$の計算量（n^3のオーダで計算の複雑さが増大していく）を必要とするため，未知変数が多い問題には不向きです．一方，反復法は，係数行列の条件が良ければ，直接法よりもかなり少ない計算量で解を求めることができます．どちらの方法でも，全要素に値が入っている係数行列（密行列）よりも，要素のほとんどが0の係数行列（疎行列）のほうが，格段に計算量が少なくて済みます．

周波数領域のマクスウェルの方程式を出発点にした差分法として，「周波数領域差分（FDFD：finite difference frequency domain）法」があります．FDFD法によって得られる線形連立方程式は係数行列のほとんどが0となるので，反復法を利用すれば比較的大規模な問題を解けます．

時間領域のマクスウェルの方程式を出発点にした差分法としては，「時間領域差分（FDTD：finite difference time domain）法」が有名です．FDTD法では，電界を計算する格子点と磁界を計算する格子点を空間的に交互に配置し，なおかつ電界と磁界を時間的に交互に計算することで，行列ソルバを使わず，高速に電磁波の過渡解析を行えます．そのため，未知変数の数が1億を越えるような大規模問題を解くこ

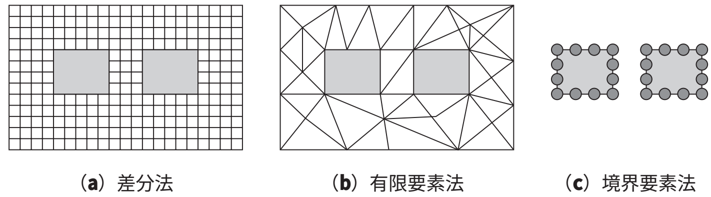


図4
電磁界シミュレータのアルゴリズムと未知変数の取りかたの違い(2次元の例)
(a)の差分法は直行格子で解析領域を分割し，各格子に未知数を設定する．これに対して，(b)の有限要素法では3角形やそのほかの形状で分割して各要素に未知数を割り当てる．また，(c)の境界要素法は未知数を境界に設定するため，解析の次元が一つ少なくなり，計算量や誤差を減らせる場合が多い

ともできます．過渡解析を行った結果にFFT(fast Fourier transform)を実行すれば，一度に広帯域の周波数領域の結果が得られるという点も，人気の理由です．FDTD法に類似した方法として，「伝達線路行列(TLM：transmission line matrix)法」や「FI(finite integration)法」もあります．ただし，FDTD法では，解析の時間ステップが進むにつれて，空間を差分化したことによる誤差が蓄積して，伝搬する電磁波の波形が崩れてくるという問題があります．この点を改善した方法として「CIP(cubic interpolated pseudo particle scheme)法」[(8)]があります．

差分法の長所は，マクスウェルの方程式を直接差分化しているため，直感的に理解しやすいという点にあります．また，解析領域を単純な直方体格子で分割するため，複雑な3次元形状を持つ物体でも，それほど手間をかけずに分割できるという利点もあります．一方で，曲面については，これを直方体格子で近似的に分割しようとすると階段状になってしまい，解析精度の点で問題となります．また，例えばアンテナの周囲に電磁波の伝搬をさえぎる物体がまったく存在せず，電磁波が反射することなく自由空間を伝搬していく(開空間の)問題を解析する場合，解析領域を無限に設定することは不可能なので，アンテナを中心とする有限の空間に解析領域を限定する必要があります．このとき，解析領域の境界部で電磁波が反射せずに伝搬するようすをシミュレーションするためには，境界部で特別な処理が必要になります．この処理のことを吸収境界条件と呼び，PML(perfectly matched layer)法などをはじめとするさまざまな方法が提案されています．ただし，反射をうまく抑えられる方法ほど，計算量を多く必要とします．この点で，CIP法には吸収境界条件が不要という長所があります．

● 有限要素法：近似関数の値を多角形の頂点の値で補間

有限要素法(FEM)は，もともと構造解析(構造物の変形や応力などの解析)用に提案された偏微分方程式の解析手法です．式(1)や，これを変形した偏微分方程式を出発点として考えます．求めたい未知変数(***E***，***H***や磁気ベクトル・ポテンシャルAなど)を解析領域全体で近似する関数を考え，これをもとの偏微分方程式に代入したときに生じる誤差(残差)を$R(x, y, z)$とします．本来は，解析領域のいたるところでRを0にできればよいのですが，それは困難なため，Rに重み$w(x, y, z)$をかけて，これを解析領域全体で積分したものが0となればよいとして，式を立てます．結果として，偏微分方程式は弱形式という積分型の方程式に変換されます．次に，未知関数の近似関数を，解析領域内の離散的なポイントの値を組み合わせて補間した形で表現します．具体的には，ある座標(x_1, y_1, z_1)の近似関数の値は，その座標を囲む多角形の頂点における値を組み合わせて補間します(この多角形のことを要素と呼ぶ)．以上により，離散的なポイントの値を未知変数とする連立方程式が導かれ，これを行列ソルバを使って解きます．

有限要素法でも導かれる連立方程式の係数行列が疎になるため，反復法を使えば大規模な問題を解くことができます．開空間の問題を解析するためには，解析領域の境界部に吸収境界条件を設定しなければなりません．おもに周波数領域の解析に用いられていますが，時間領域の解析を行うことも可能です．

有限要素法の長所としては，解析領域内に設定する離散的なポイントを格子状にとる必要がないため，差分法で問題となった曲面への対応が容易です．先に述べたように，離散ポイントは多角形要素の頂点に配置されます．例えば2次元の問題(2次元電磁界シミュレータ)の場合，一般には3角形の要素が用いられます(**図4(b)**)．解析領域を多角形要素に分割する処理を要素分割と呼びます．分割のよしあしで解析精度が左右されるため，要素分割だけでもさまざまな手法が提案されています．

また，未知変数がベクトル量の場合，これを多角形要素の頂点に設定すると，スプリアス解というまちがった解が混入するという問題があります．これを防ぐためには，多角形要素の辺に未知変数を設定する「辺要素法」に対応した

シミュレータを用いる必要があります．

● 境界要素法：積分方程式を出発点として計算

境界要素法は，式(1)に示したような微分方程式から出発する方法とは異なり，積分方程式を出発点とする方法です．ここでは境界要素法の中でも，電磁界シミュレーションの技法として有名な「モーメント法(MoM：method of moments)」[9]について説明します．モーメント法は，電圧を境界条件として，導体上の電流分布を計算する周波数領域の方法です．未知変数を導体表面上にのみ設定すればよいため，差分法や有限要素法のように解析領域を格子や要素に分割して未知変数を設定する必要がありません．つまり，未知変数の数が圧倒的に少なくなります(**図4(c)**)．

モーメント法では，マクスウェルの方程式の積分表現を出発点として考えます．最終的に電圧を境界条件として電流を計算するわけですが，マクスウェルの方程式を出発点としているという点から，モーメント法はれっきとした電磁界シミュレーションの技法と考えられます．具体的には，導体上に分布する電流とグリーン関数(微分方程式や偏微分方程式の解法で使われる関数)の積を，電流の分布する領域で積分したものを，磁気ベクトル・ポテンシャルAとして表現します．グリーン関数は，ある位置に単位インパルス波源を置いたときの観測点における場を表します．したがって，各電流によって生じる場の重ね合わせとしてAを表現します．電界$\boldsymbol{E}$はベクトル・ポテンシャルAを使って表すことができるため，結果として，電界$\boldsymbol{E}$に関する積分方程式が得られます．次に，積分方程式を離散化するために，導体を微小区間に(平面導体の場合はパッチに)分割し，電流素辺を割り付けます．最終的に，電流素辺の値を未知数とする連立方程式が導かれます．

モーメント法では導体上にのみ未知数を設定するので，未知数の数は少なくなります．しかし，欠点として，連立方程式の係数行列が密行列になるという性質があります．そのため，あまり大規模な問題の解析には向きません．これを克服するため，遠方の複数の波源からの影響を近似的に簡単化して計算する「高速多重極展開法(FMM：fast multiple method)」などが提案されています．また，解析領域において境界を考える必要がないため，開空間の問題に向いています．

問題点として，絶縁体の材料が一様であれば，グリーン関数は簡単に求まりますが，複数の材料の境界が存在している場合には，グリーン関数の計算が非常に複雑になります．したがって，モーメント法のシミュレータでは，解析できる問題がプレーン構造の平面回路などに限定される場合がほとんどです．

先ほど説明したPEEC法とモーメント法は理論的に類似しており，モーメント法の長所や短所がそのままPEEC法にも当てはまります．言い換えれば，PEEC法は，モーメント法の連立方程式を作成するまでの部分と，連立方程式を解く部分を分けたもので，前者を寄生パラメータの抽出によって，後者を回路シミュレータによって行います．

ただし，モーメント法では，ある波源の影響が別の導体の場に及ぶまでの時間的・空間的な距離(retardation)を考慮していたのに対して，PEEC法ではこれを無視してしまっています．例えば，PEEC法では，導体aとbの間で相互インダクタンスを考えた場合，たとえaとbが距離的に離れていたとしても，aの電流が変化するとまったく同時にbに誘導電圧が生じます．実際には，aの電流が変化すると磁界が変動し，それがbまで伝わるのには有限の時間がかかるはずです．PEEC法では，これを単純なK(相互インダクタンス)素子に置き換えてしまうため，距離に伴う時間遅れを考慮できません．一方，この電磁波が伝搬する時間遅れの影響まで考慮した「rPEEC法」が提案されていますが，寄生キャパシタンスやインダクタンスが周波数に依存する形で定式化されるため，これをもとに回路シミュレータによって過渡解析を行うことは困難です．

● 3次元解析は並列処理やマクロ，動作モデルで高速化

通常，伝送線路モデルでは，理想的なグラウンド・レベルを想定しています．したがって，同時スイッチングのように接地面(の電位)が揺れるような問題を正確に見積もるためには，3次元の構造を考慮した電磁界シミュレータによる解析が必要となります．

ここで，3次元FDTD法を実用的なプリント基板解析に利用することを考えてみましょう．通常のプリント基板上の配線幅は50μm～100μm程度です．ビアなどの影響を考えた解析を実施するためには，最低でも50μm～100μm程度の間隔で解析メッシュに分割する必要があります．10cm×10cmのプリント基板を100μm刻みの格子でメッシュ化すると，水平面(X-Y平面)だけで，1000×1000＝10^6個の格子に分割されることになります．さらにZ方向に，層数の数倍のメッシュ分割が必要となります．3次元

FDTD法では，X，Y，Z軸方向にそれぞれ電界・磁界成分を持つため，1セルにつき6変数，合計で$6 \times 10^6 \times$(Z方向分割数)を持つことになります．プリント基板全体を3次元化して解くことがどれほどたいへんな作業であるかがわかると思います(**図5**)．

1) 並列分散処理による高速化技術

3次元の電磁界解析は，このようにとてもコストのかかる(処理量の大きい)作業です．そこで，複数のコンピュータを用いて並列分散処理を行うことで処理時間を短縮することも行われています．この並列処理に適したアルゴリズムとそうでないアルゴリズムがあります．例えば，FDTD法に基づく電磁界解析アルゴリズムは並列分散処理にとても適した手法であることが知られており，また，その効果が実証されています[6]．

2) マクロ・モデルと動作モデリング[4],[7]

設計の現場では，設計工程や開発スケジュールに沿った検討が要求されるため，場合によっては精度を犠牲にしても高速な解析が望まれる場合があります．また，部分的に詳細な結果が要求される一方で，ほかの部分はおおまかに解析して迅速に結果を得ることが求められる場合もありま

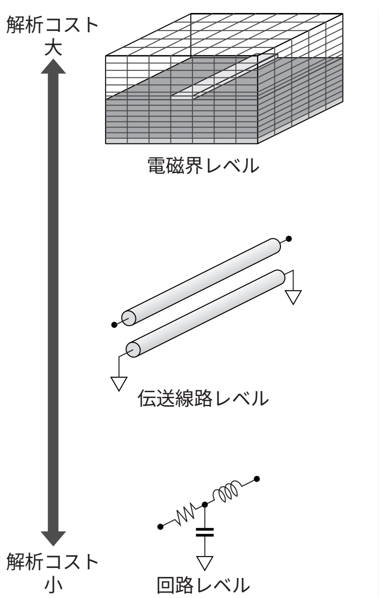


図5　解析レベルと解析コスト
3次元の電磁界解析は，解析領域全体を詳細に分割して計算するため，解析コストがもっとも大きい．これに比べて伝送線路モデルは準TEM状態を仮定したモデル化を行っているため，少ない演算量で解が得られる．回路レベルでは集中定数としてモデル化するため，さらに少ない演算量で解が得られる

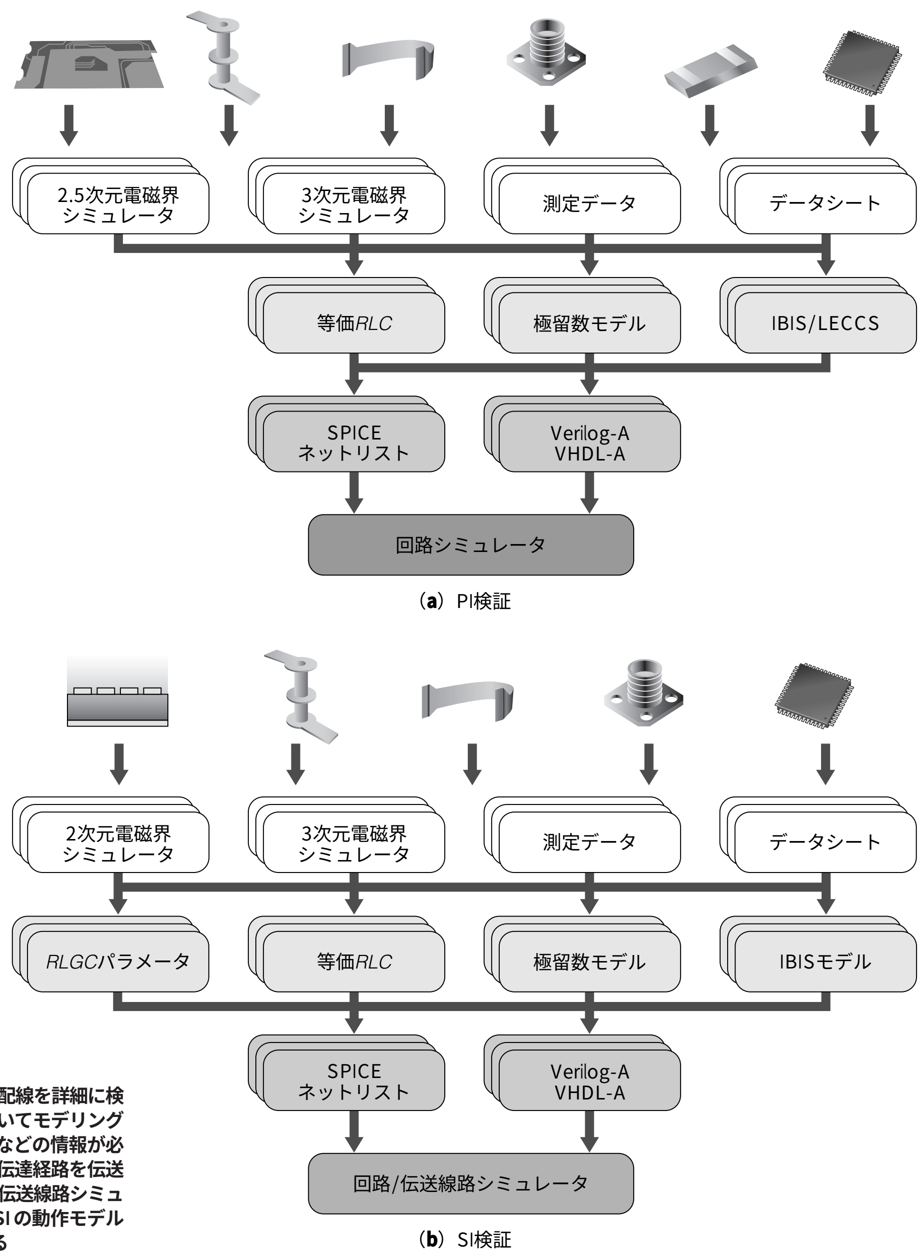


図6
PI検証とSI検証の基本フロー
(a)の電源品質(PI)の検証では，電源/グラウンド配線を詳細に検証する必要があるため，電磁界シミュレータを用いてモデリングする．また，LSIのスイッチング時に流れる電流などの情報が必要となる．(b)の信号品質(SI)の検証では，信号伝達経路を伝送線路や等価回路(*RLGC*)としてモデルを作成し，伝送線路シミュレータや回路シミュレータで動作検証を行う．LSIの動作モデルとしては，SPICEモデルやIBISモデルを使用する

す．そのようなとき，精度が要求されない部分に対して，部分ブロックを等価的なモデル（簡易モデル）に置き換えて全体をシミュレーションすることが考えられます．詳細な解析を回避しながら等価的なモデルに置き換える手法を「マクロ・モデリング」と呼びます．

さらに，アナログ・ブロックのふるまいを表現するためのハードウェア専用の記述言語が開発されています．こうした記述言語には，アナログ版とディジタル版がありますが，アナログHDLでは微分演算子や積分演算子，ラプラス変換演算子，Z変換演算子，さらには`if`文など，多様な記述が用意されているため，容易にアナログ動作（ビヘイビア）を記述（モデル化）できます．この場合も詳細な解析（回路レベルや3次元構造の考慮）を回避することが可能なので，全体シミュレーションの効率化が期待できます．

● PEECやFDTD，高速化手法はココに使われている

以上で述べたシミュレーション技術が，実際の検証のどこにどのような形で用いられているかを紹介します．

1）電源品質の検証（同時スイッチング・ノイズの解析）

電源品質（PI）の検証では，とくに電源/グラウンドに着目して解析を行います．電源系の高周波ノイズを減少させるためには，負荷側から見た電源系のインピーダンスを高周波帯域まで低く抑える必要があります．これを検証するためには，電源/グラウンド系を，PEEC法などを用いてRLCの等価回路としてネットリストに記述します．また，電源系に接続されるビアやコネクタ，LSIの電源ピン，パスコンなどについても，データシートや測定データ，電磁界解析の結果をもとに等価回路を作成し，ネットリストや動作記述言語で記述します（**図6（a）**）．これらを接続して，電源系のインピーダンス特性を交流解析によって計算します．

スイッチング・ノイズの過渡波形を観測したい場合には，上記と同じネットリストを過渡解析します．このとき，電源/グラウンド系については，PEEC法の代わりに2次元の有限要素法やFDTD法で解析するシミュレータもあります．

2）信号品質の検証（遅延，タイミングの解析）

高速ディジタル回路の信号品質（SI）の検証では，配線における信号の減衰や遅延，反射，クロストーク・ノイズなどの影響を確認します．そのため，プリント基板やパッケージ内の配線については伝送線路としてモデル化します．伝送線路のR，L，G，Cのパラメータは，その断面形状をもとに電磁界シミュレータを使って抽出します．配線に接続されるビアやコネクタ，LSIの信号I/O（I/O回路，I/Oピン）についても，データシートや測定データ，電磁界解析の結果から等価回路を作成し，ネットリストや動作記述言語で記述します（**図6（b）**）．これらを接続し，回路シミュレータや伝送線路シミュレータを用いて，信号のジッタやアイ・ダイヤグラムを計算します．

また，とくにRF（radio frequency）回路のSI検証では，モーメント法によるシミュレータを使った周波数特性の検証が行われます．配線の折れ曲がりや分岐，不完全なグラウンドの効果までを含めてSパラメータなどを計算します．

3）EMI検証（電磁波妨害の解析）

EMI検証では，プリント基板やケーブルなどから放射されるEMIの問題を解析します（**図7**）．FCC（米国連邦通信委員会）などの基準をクリアするうえで問題となるような放射が発生しないかを，電磁界シミュレータを使って確認することになります．

といっても，プリント基板やパッケージの微細な構造をモデル化し，さらにシールドや筐体まで含めて電磁界シミュレータでまるごと計算することは，計算量が膨大になってしまうため，現実的ではありません．ケーブルをアンテナ，電源/グラウンド系をプレーン，シールドを金属壁などに単純化して置き換えることで，あくまでも目安として簡易的にEMIを解析することが可能です．

一方，電磁界シミュレーションの技法の中でも，FDTD法は，並列計算機の上で実行することによって大規模な問題に対応しやすいということが知られています．これを利用して，プリント基板やパッケージなどを極力詳細にモデル化して解析することを目ざしたシミュレータも存在します．このようなシミュレータでは，FDTD法でモデル化しきれない素子（LSIなど）については回路シミュレータで解析し，過渡解析の各時間ステップで，お互いのデータを交換しあいながら計算を進める方式をとっています(5)．しかし，このようなシミュレータであっても，微細な構造を完全にモデル化できてはいないため，解析結果はあくまでも目安として考える必要があります．

● 設計支援環境の変革が求められる

以上，LSIからプリント基板までの解析に用いられるシミュレーション技術について説明しました．高性能電子機器の生産性向上のためには電源系や信号伝送，電磁波妨害の問題を解決しなければならず，今後の設計支援環境の発

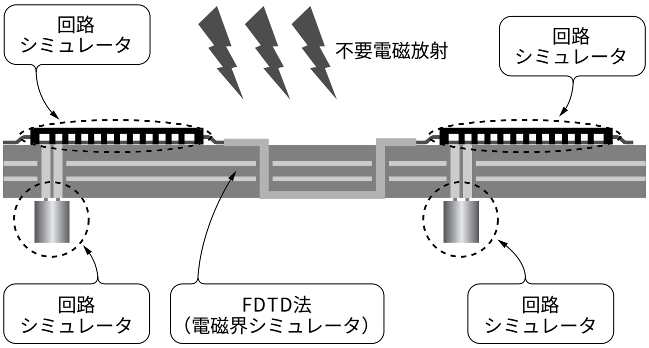


図7　EMI検証の例

電磁界シミュレーションを用いてEMI検証を行う手法の例．FDTD法は大規模な解析に比較的適用しやすい．回路シミュレータと連動させることで，回路動作から生じるノイズがプリント基板の構造のどこを経由して最終的に不要電磁放射となるかを検討できる

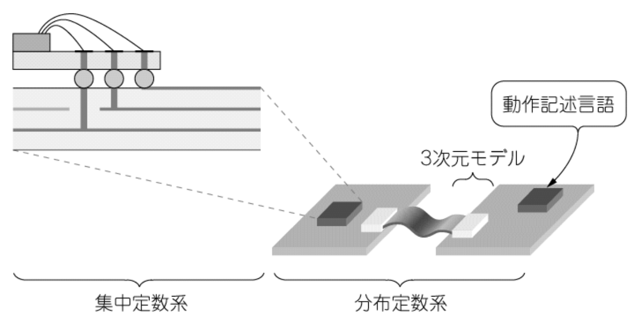


図8　統合設計環境で検証する内容

複雑な現象を解析するためには，大きさや時定数の異なる現象を同時に協調して解析する必要がある．集中定数系と分布定数系を同時に解析したり，動作記述言語で抽象的にLSIを表現してシミュレーションするなどの機能が期待される

展に期待したいところです．設計者の立場から望まれる設計支援環境として，以下の項目が必要と考えます(**図8**)．

- 集中定数系と分布定数系の両方を扱える
- 配線や基板に対して，詳細な3次元モデルが利用できる
- 動作モデルが利用できる
- 電磁界解析と親和性があり，チップ，パッケージ，プリント基板といったマルチレベルの解析が可能
- LSI用EDAとEMC解析用EDAが統合可能
- 高精度，高速な検証技術が利用可能

また，シミュレーションを有効に活用するためには，モデルがもっとも重要になりますが，LSIメーカからSPICEモデルを入手するのに時間がかかるなどの問題があります．さらに，EDAベンダが提供しているツールの入出力データは独自フォーマットのものが多く，相互にシームレスに接続するためには，多くの困難があります．このような状況を打破する設計支援環境の出現が期待されます．

参考・引用*文献

(1) H. Heeb, A. E. Ruehli；Three-Dimensional Interconnect Analysis Using Partial Element Equlvalent Circuits, IEEE Tran. CAS-I, vol.39, no.11, Nov. 1992.
(2) 浅井秀樹；チップ/パッケージ/ボード統合設計のための電気系シミュレーション技術，エレクトロニクス実装学会 平成17年 第1回公開研究会，2005年6月．
(3) 浅井秀樹，渡邉貴之；電子回路シミュレーション技法，科学技術出版，2003年．
(4) 浅井秀樹，村山敏夫；アナログハードウェア記述言語(AHDL)の研究動向，電子情報通信学会誌，vol.83，no.3，2000年3月．
(5) 特集 電源雑音は元から断つ，日経エレクトロニクス，no.879，2004年8月2日号．
(6) 荒木健次，村山敏夫，鈴木誠，渡邉貴之，浅井秀樹；電源雑音を手なずけるツールを開発プリント配線基板を4時間で解析，日経エレクトロニクス，no.892，pp.117-130，2005年1月31日号．
(7) 浅井秀樹；電磁界解析とモデルリダクションに基づく回路シミュレーション技術の動向，エレクトロニクス実装学会誌，vol.4，no.5，pp.364-367，2001年8月．
(8) 矢部孝，尾形陽一，内海 隆行；CIP法－原子から宇宙までを解くマルチスケール解法，森北出版．
(9) 山下栄吉監修；マイクロ波シミュレータの基礎，電子情報通信学会，2004年．

むらやま・としお　ソニー(株)
わたなべ・たかゆき　静岡県立大学経営情報学部 講師
あさい・ひでき　静岡大学工学部 システム工学科 教授

<著者プロフィール>

村山敏夫．LSI/基板EDA，大規模回路，電磁界シミュレーション，数値解析アルゴリズムの開発に従事．

渡邉貴之．おもに回路・配線・電磁界シミュレーションに関する研究に従事．

浅井秀樹．1985年に慶応義塾大学大学院 博士課程修了．上智大学理工学部 電気電子工学科 助手を経て，1986年より静岡大学にて教職をつかさどる．2006年，セサミテクノロジーを起業．専門は，LSI/EMC-CAE，アナログ回路設計など．著書に「ディジタル回路演習ノート」(コロナ社刊)，「電子回路シミュレーション技法」(科学技術出版刊)がある．現在，電子情報通信学会 非線形問題研究専門委員会 副委員長，エレクトロニクス実装学会 理事および回路・実装設計技術委員会 副委員長．

2